



TITLE:

# シリーズ:研究内容紹介・研究室研究テーマ紹介

AUTHOR(S):

---

CITATION:

シリーズ:研究内容紹介・研究室研究テーマ紹介. Cue 1999, 3: 19-38

ISSUE DATE:

1999-06

URL:

<https://doi.org/10.14989/57785>

RIGHT:

## シリーズ：研究内容紹介

このページでは、電気系関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

### 電気系関係研究室一覧

#### 工学研究科

##### 電気工学専攻

複合システム論講座（荒木研）

電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（島崎研）

電磁工学講座 超伝導工学分野（牟田研）

電力工学講座 電力発生伝送工学分野（宅間研）

電力工学講座 電力変換制御工学分野

電気システム論講座 電気回路網学分野（奥村研）

電気システム論講座 自動制御工学分野

電気システム論講座 電力システム分野（上田研）

##### 電子物性工学専攻

集積機能工学講座（鈴木研）

電子物理学講座 極微真空電子工学分野（石川研）

電子物理学講座 プラズマ物性工学分野（橘研）

機能物性工学講座 半導体物性工学分野（松波研）

機能物性工学講座 電子材料物性工学分野（松重研）

量子工学講座 光材料物性工学分野（藤田研）

量子工学講座 光子電子工学分野

量子工学講座 量子電磁工学分野

##### イオン工学実験施設

高機能材料工学講座（山田研）

#### エネルギー科学研究科

##### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（吉川榮研）

##### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野（近藤研）

##### エネルギー応用科学専攻

応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野（塩津研）

応用熱科学講座 エネルギー応用基礎学分野（野澤研）

#### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門 原子エネルギー研究分野（井上研）

エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（吉川潔研）

エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野（大引研）

エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野（佐野研）

#### 超高層電波研究センター

超高層電波工学部門（松本研）

レーダー大気物理学部門（深尾研）

数理電波科学部門（橋本研）

超高層物理学部門（津田研）

#### 京都大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー（KU-VBL）

#### 情報学研究科

##### 知能情報学専攻

知能メディア講座 言語メディア分野

知能メディア講座 画像メディア分野（松山研）

##### 通信情報システム専攻

通信システム工学講座 デジタル通信分野（吉田研）

通信システム工学講座 伝送メディア分野（森広研）

集積システム工学講座 大規模集積回路分野（田丸研）

集積システム工学講座 情報回路方式分野（中村研）

集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤研）

##### システム科学専攻

システム情報論講座 画像情報システム分野（英保研）

## 研究室研究テーマ紹介

### 複合システム論講座（荒木研究室）

#### PID 制御系の新しい展開

前号で御紹介したように、本研究室は昨年7月、スタッフの移動に伴い新たなスコープの下で出発したところです。その目標は「複合システム論を発展させつつ、医療への応用を軸に貢献していこう」というところにあります。医療応用の例については前号でリストアップしましたので、ここではその基礎となっている工学的技術の中で、PID調節計・モデル予測制御・状態予測制御といったプロセス制御関連の技術の研究について説明します。

PID調節計は工業用の記録計をその源泉とするもので、プロセス制御の分野では現在でも広く用いられています。P（比例）・I（積分）・D（微分）の3動作を備えた汎用型のものとしては、1939年に発売されたTaylor Instrument社のpre-act動作付Fulscope、およびFoxboro Instrument社のhyper-reset動作付のStabilogが最初とされております。これらはいずれも空気式の記録計から発展したもので、オン・オフ動作、小範囲の比例動作、比例+積分動作を経て完成されたものです。以来、ハードウェア的には飛躍的な改良がありましたが、制御則という面では1970年ごろまで同じ形がつづいておりました。

1970年頃にデジタル計装が普及するに伴い、PID要素による直列補償の不都合を何とか解決しようという試みが現れ、微分先行型やI-PDといった構造が提唱されました。本研究室のスタッフもこの問題に注目して、1980年代半に2自由度PID調節計を提唱しました。これは微分先行型、I-PDを特殊な場合として包含する装置で、いわばアドバンスト型PIDの集大成といったものです。

さて、このPID調節計が現在、どの程度使われているかといいますと、プロセス産業（すなわち鉄鋼、化学、セメント、薬品、紙、などの工場）においては、制御ループの90%がPIDもしくはアドバンスト型PIDで動いています[1989年の日本電気計測器工業会の調査による]。このようにPID調節計はプロセス産業で非常に重要な位置を占めているのですが、残念ながら大学でこれを継続的に研究しているところはほとんどありません。本研究室では2自由度PID調節計について、最適調製法、適応動作の導入、アンチリセットwindアップ方式、クロスリミット制御などの研究を続けています。

上記のように、プロセス制御の大部分のループがPIDで動いているわけですが、これだけですべての要求に答えられるというわけではありません。PIDは1変数制御装置としてみたとき、簡便さ・歴史・必要機能の充足などを総合して非常に優れた制御装置と言えます。しかし、むだ時間や振動要素を含むシステムのフィードバック制御、多変数制御、さらにシステム全体の（コスト、エネルギー、環境汚染などの面での）最適化、特に状態量制約があるような非線形システムの最適化といった問題はさらに高度な制御方式や最適化手法が要求されます。本研究室では、プロセス制御の分野で有力な手法として注目されているモデル予測制御、およびむだ時間への対策として重要な状態予測制御について、ロバスト設計法、アンチリセットwindアップ方式などの研究を行い、医療への応用に役立てています。

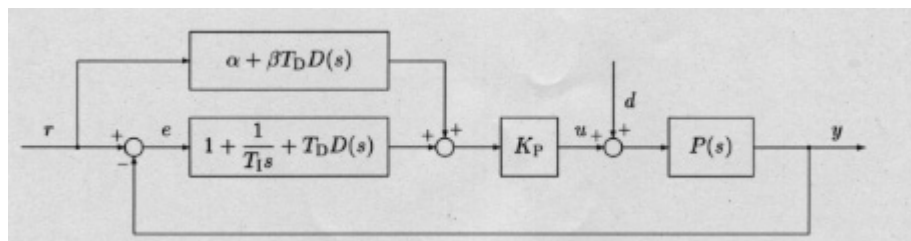


図1：2自由度PID制御系

## 電磁工学講座 超伝導工学分野（牟田研究室） 磁束ポンプを用いた全超電動発電機

牟田研究室は、1995年10月に発足した研究室です。21世紀のキーテクノロジー「超電導技術<sup>1</sup>」の電力機器への応用研究を行っています。回転機と静止器の2つのグループでゼミをし、国際的な協力体制の元で超電導発電機、超電導変圧器、超電導送電ケーブル、超電導スイッチ、超電導マグネット、酸化物超電導体の研究を行っています。その中で、全超電導発電機の研究を紹介します。

国家プロジェクトとして界磁巻線を超電導化した70MW発電機の開発が今年度終了しますが、電機子巻線も超電導化すれば研究中の超電導変圧器、超電導送電ケーブル等とあわせて超電導電力系統が構築でき、高効率・高密度化が図れ、CO<sub>2</sub>削減にも寄与します。また、発電機の励磁機も磁束ポンプを用いて超電導化すれば、磁束一定のため電圧変動率は小さくなり、安定度が向上するとともに、電流リードを細くできるのでより小型化が図れます。こうした点から全超電導発電機の研究を行っています。

図1に示すように、20kVA級の全超電導発電機を自作し、これに磁束ポンプと呼ぶ所謂超電導励磁機を適用した超電導界磁巻線のブラシレス励磁系を確立し、その発電に世界で初めて成功しました。1988年のことです。これは世界的にも例を見ない新タイプの全超電導機であり、特性解析・実験的研究を継続しています。磁束ポンプの動作原理を図2で説明します。超電導状態にあるNbストリップに磁石を近づけて下部臨界磁界以上の磁界を印加すると、その部分（ $W \times h$ ）だけ常伝導状態になります。常伝導領域の周囲は超伝導状態ですから常伝導領域の周囲に遮蔽電流が流れます。磁石を矢印の方向に負荷コイルとNbストリップで囲まれた空間まで移動させると、遮蔽電流は負荷コイルを流れることになります。外側の配線は印加磁界では下部臨界磁界を越えないNbTiで構成してありますので、磁石が配線を通り過ぎても磁束は補足されたままになります。この原理を巧みに利用したのが磁束ポンプ励磁機です。

これまで、磁束ポンプを用いて界磁巻線を励磁できること、電機子巻線まで超電導化した全超電導発電機で電気出力を得られることを実証し、磁束ポンプの励磁特性解析まで行ってきました。現在、次期国家プロジェクトに合わせた励磁系の設計を行うと共に、励磁機に採用した磁束ポンプは、延世大学との研究協力に展開し、韓国電気研究所の界磁超電導発電機の開発研究をサポートするために、研究員を受入れるとともに30kVA超電導発電機の設計、特性評価を行い、次のステップに進んでいます。



図1：20kVA級の全超電導発電機の概観

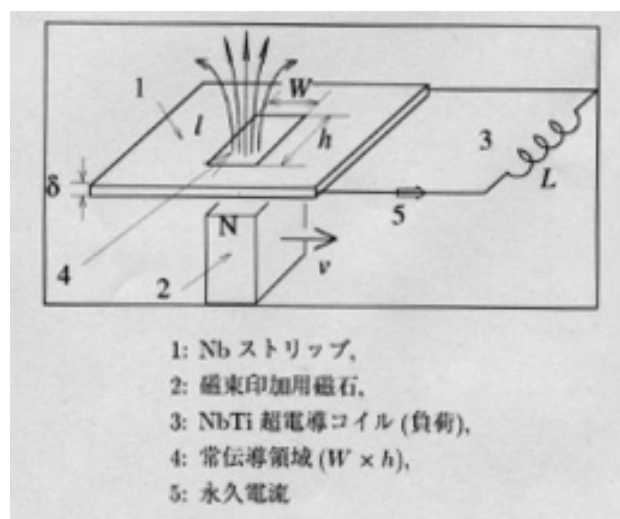


図2：磁束ポンプの原理

<sup>1</sup> 超電導と超伝導を使い分けていますが、現象や物理を言うときには「超伝導」、導電体や複合化材料や電気的特性を議論するシステムを指す時には「超電導」をもちいました。



## 電気システム論講座 自動制御工学分野 ディジタル制御理論の新展開

現在では、多くの制御応用分野で、計算機を用いた制御、いわゆるディジタル制御が主流となっている。いうまでもなく、それは、計算機の能力の飛躍的な向上と廉価なプロセッサの出現に支えられたものであるが、これにより、複雑な制御則を高い信頼度で実現し、また制御則を状況に応じて柔軟に切り替える、といったことが、容易かつ安価に実現可能となった。このことは、制御性能の向上に大きく寄与したが、一方では、ディジタル制御は、従来のアナログ制御（連続時間制御）の場合とは本質的に異なる面を有している。たとえば、よく知られたサンプリング定理とも密接な関係にあるエイリアシングの問題や、サンプリング時刻間で応答が振動的となることがあるというリップルの問題などが、ディジタル制御特有の問題として挙げられる。ますます高度の制御性能の達成を期待される中、これらの問題に対して理論面で解決すべきことがらも少なくない。ここでは、そのような立場から当研究室で行っている研究の一端を紹介する。

ディジタル制御において制御装置として用いられる計算機は、制御ループから見れば、サンプリング周期ごとに間欠的に動作する離散時間系である。これに対して、制御対象である実システムは、入出力信号が時々刻々と変化する連続時間系である。このように、ディジタル制御系は、連続時間系と離散時間系が混在した系であるという特徴があり、連続時間系（アナログ）の制御装置を用いた場合（すなわち連続時間制御系）ではそのような混在が発生しないという点で、全く対照的である。この混在のため、閉ループ系の性能を「完全な意味で」解析したり、また、そのような「完全な意味での性能」に着目してそれを良好にするような制御装置を設計することは、従来は容易ではなかった。ここで「完全」というのは、サンプル点間の応答（すなわち、計算機に取り込まれるサンプリング周期ごとの応答でなく、計算機からは見えないその間での応答：図1）をも厳密に考慮に入れるということであり、エイリアシングやリップルの影響を正しく考慮に入れるということでもある。この難点のため、従来は、近似的な取り扱いとして、以下の2つのいずれかの方法でディジタル制御装置が設計されていた（図2）。

- (i) 連続時間（アナログ）制御装置を設計した後、それを近似するようなディジタル制御装置を導く。
- (ii) 制御対象のサンプリング周期ごとの動作のみに着目することで、それを離散時間系として近似し、これに対してディジタル制御装置を設計する。

上記いずれの方法でもタイプの違うシステムの混在による厄介を設計時には避けて通れるが、上述の問題を「完全に」厳密に扱ったものといえないため、十分な制御性能をこれらの方法で達成するのは難しい。当研究室では、このような近似を一切行うことなくディジタル制御装置を直接設計するという、「混在」の問題を完全に解決した新しい方法（図2の「直接設計」）に基づいて、ディジタル制御系の解析と設計に関する研究を行っている。具体的な手法としてはFR作用素やリフティングと呼ばれる概念を用いたものであるが、いずれもディジタル制御系を無限次元空間上の写像としてとらえることで関数解析における成果を援用したものといえる。

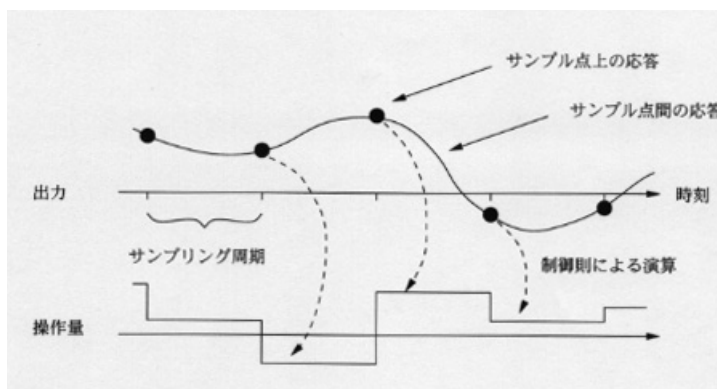


図1：サンプル点間応答

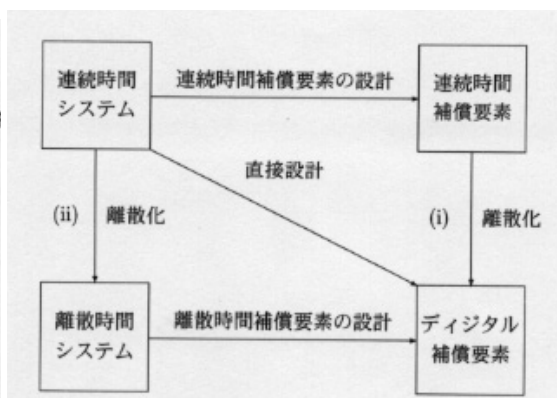


図2：ディジタル制御装置の設計手順

## 電気システム論講座 電力システム分野（上田研究室） パワーエレクトロニクスのハイブリッドシステム理論に基づく理論構成 —職人的経験則を理論的枠組みへ—

1. はじめに パワーエレクトロニクス回路においてスイッチング動作はその基本動作であり、不連続に回路を切換えて状態空間を接合することにより、平均的に希望の出力状態を作り出すことを可能にしている。この様なシステムでは、異なる物理法則に基づく時間スケールの異なる現象が共存し、かつシステムとして必ずしもキルヒホッフの回路法則に従わない。このようなシステムをハイブリッドシステムと呼ぶ。

パワーエレクトロニクス回路の動作は、早い時間スケール（スイッチング期間）と遅い時間スケール（過渡および定常期間）など、複数の時間スケールの現象が同時に存在するダイナミカルシステムであり、この様な系は特異摂動系と呼ばれ、弛張振動などの解析に関連して古くから多くの研究がなされて来た。しかし、多次元のシステムの場合には、理論的研究も数値計算による研究もほとんどない。この様な状況がパワーエレクトロニクス技術の理論的完成を阻み、さらには数学的な基礎の脆弱な、経験則に頼った職人的技術としてしか見てこれなかった遠因と考えられる [1]。本研究はパワーエレクトロニクス技術を新たな理論的枠組みに乗せ、システムとして高い機能性を付与していくことを目的としている。

2. 特異摂動系とスイッチング 特異摂動系は、一般に

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ \dot{y} = \varepsilon g(x, y) \end{cases}$$

等で記述できる。 $x$  は早く変化する状態変数、 $y$  はゆっくり変化する変数である。この様な系の  $\varepsilon \rightarrow 0$  の極限が理想的なスイッチを表す。その際スイッチ動作は写像と見ることが出来る。現実の回路は連続時間と離散時間の特性を合わせ持つハイブリッドダイナミカルシステムとなる [2]。スイッチ動作を持つパワーエレクトロニクスの回路動作はこの系で記述される力学系となる。

3. 実回路に見られる現象 簡単なスイッチング回路（DC-DCコンバータ回路：図1）で生じる不安定現象を図2に示す。この様な動作はスイッチの機能を記述しない限り理論的に得ることができない。現在、この系の実験結果の上述の特異摂動理論に基づく検討を行っている。この様な検討は、電力システムで使用される大容量パワーエレクトロニクス機器から小型の安定化電源技術にまで関連しており、特に電力システムのパワーエレクトロニクス機器（FACTS機器）の動作をこの枠組みで検討することは、連続系が主体の電力システムのパワーエレクトロニクス機器による制御を行う場合には避けて通れないものである。

参考文献 [1] 引原、システム／制御／情報、Vol.41, No.7, (1997) 240-245, [2] S. Johnson, Int. J. Bif. & Chaos, Vol.4, No.6 (1994) 1655-1665.

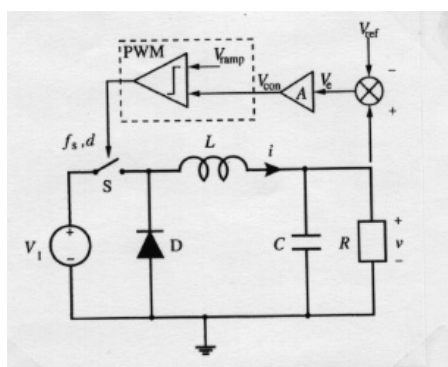


図1 DC-DCコンバータ回路

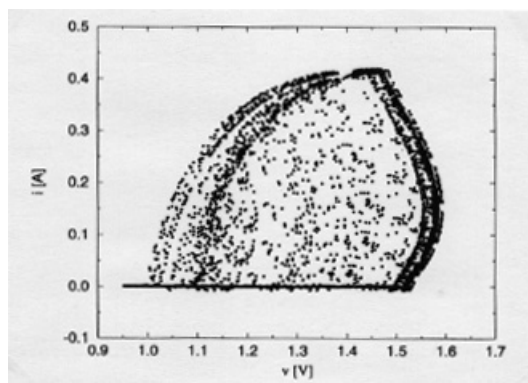


図2 出力不安定現象

## 電子物理学講座 プラズマ物性工学分野（橋研究室）

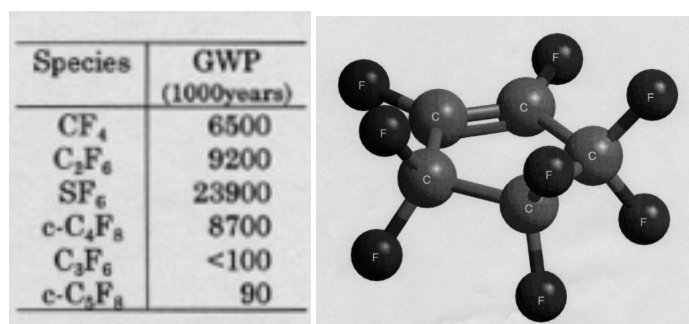
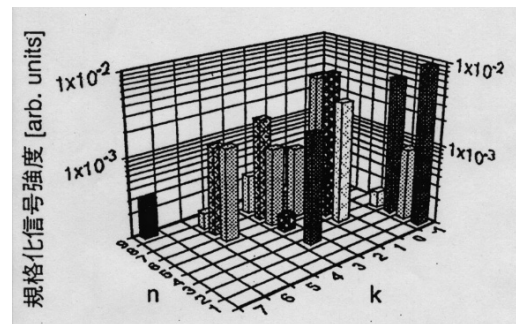
## フルオロカーボンプラズマの分光診断と制御

—SiO<sub>2</sub>/Si選択エッチング機構の解明と低環境負荷プロセスの開発—

超LSIにおけるデバイスの微細化が進むにつれ、エッチングや薄膜形成（CVD）プロセスにおいて、よく制御され再現性が高いプラズマ生成技術がますます重要となってきた。我々の研究室では、プロセス用プラズマにおける気相および基板表面の状態を診断するための種々の分光計測法を開発するとともに、それらを駆使してプロセス中で生じている物理・化学過程を解析することにより、高精度なプロセス制御法を確立することを目標に研究を進めている。その代表例として、コンタクトホール形成に用いられているフルオロカーボンプラズマに関する研究が挙げられる。このプロセスでは、大きいアスペクト比（深さ／開口径）形状での高い異方性と下地材料のSiに対する高い選択比が求められる。プロセスガスとしては、直鎖状のCF<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>、C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>や環状のC<sub>4</sub>F<sub>8</sub>などの飽和フッ素化合物（per-fluoro compound, PFC）あるいは水素を含んだCHF<sub>3</sub>などが用いられている。選択性のメカニズムは、エッチングとデポジションの材料依存性を微妙に制御することによって実現されている。つまり、Si上に選択的にフルオロカーボンポリマーが堆積するような条件では、Siのエッチングが阻止されSiO<sub>2</sub>のみがエッチングされる。

選択性向上のためには、プラズマ中のイオンや中性ラジカルの組成と基板衝撃エネルギーを、被加工材料に応じて精密に制御することが重要であり、気相や表面でのその場（in situ）計測の必要性がますます高まってきている。我々は、従来のレーザー誘起蛍光法などに加えて、最近、真空紫外域でのレーザー吸収法（VUV-LAS）、電子付着型質量分析法（EAMS）、赤外域での位相変調偏光解析法（FT-IR PMSE）という3つの新しい計測法を開発し、フルオロカーボンプラズマ中での高精度のラジカル計測や表面の化学結合状態の計測を可能にできた。中でもEAMSは、電子親和力を有する中性種に質量分析管の中で低速の電子を付着させて負イオンとして検出するという方法で、高分子量の中性種も分解せずに測定できる特徴をもつ。アイデアは単純ではあるが、逆転の発想で成功した例として各方面から注目されている。

しかし近年、Siウエハの大面积化や高アスペクト比形状への対応から、低圧力動作の高密度プラズマ源が用いられるようになるにつれ、エッチングの選択性と再現性の劣化という問題が再び顕在化してきた。また、地球環境問題の観点から、地球温暖化係数（GWP）の大きいPFCの使用が制限され、代替PFCガスの探索や、それを用いた新規プロセスの確立が急務となっている。我々はこれらの問題解決に対して、不飽和型でGWPが小さく大気中での寿命の短いC<sub>3</sub>F<sub>6</sub>やC<sub>5</sub>F<sub>8</sub>などのガスを用いて、プロセス中の反応過程の解析や排ガスのin situ分析の課題に取り組んでいる。図1に代表的なプロセスガスのGWP値と量子化学計算によるC<sub>5</sub>F<sub>8</sub>の分子構造を示す。図2には、EAMSで測定したC<sub>5</sub>F<sub>8</sub>プラズマ中の中性種の組成を示す。プラズマ中では原料ガスが分解したものだけでなく、反応によって会合した高分子量の中性種も多く生成していることがわかる。それらの選択的なデポジションをうまく制御することによって、Siのみならずフォトリソストに対する選択性も向上できる見通しが立ってきている。

図1 代表的プロセスガスのGWP値とC<sub>5</sub>F<sub>8</sub>の分子構造図2 C<sub>5</sub>F<sub>8</sub>プラズマ中で生成される中性種



## 機能物性工学講座 電子材料物性工学分野（松重研究室） 有機強誘電体薄膜を用いた分子メモリーに関する研究

### 1. 序

近年の電子回路の集積度は飛躍的な速さで向上しつつあり、その素子サイズの微細化に伴いナノメートルスケールの構造作製・制御が以前にも増して重要な課題となっている。こうした中、素子の機能単位サイズを分子スケールにまで微細化しうる「分子ナノエレクトロニクス」の実現に大きな関心が寄せられている。当研究室では、ナノスケール構造観察・制御や分子操作を行う上で不可欠となる走査プローブ顕微鏡（SPM：Scanning Probe Microscopy）テクノロジーによる独自のアプローチによって、有機電子材料の分子スケール電子物性を探るとともに、分子機能の発現に必要なナノスケールでの分子の操作、組織化、配向制御などの研究を行っている。本稿では、これらの研究の中でも有機強誘電体分子薄膜を用いた分子メモリーに関する研究について紹介する。

### 2. 研究内容

走査プローブ顕微鏡探針により強誘電体薄膜に十分高い電場を加えると、探針直下の局所的な領域が分極して微小な分極領域が形成される。われわれは、有機強誘電体分子を用いてこの微小分極領域形成による分子メモリーの実現をめざして、その微小分極領域のナノスケール電気特性を評価している<sup>1), 2)</sup>。実験には、膜厚10～100nmの強誘電性高分子 [P (VDF/TrFE)] の薄膜をスピコートによりグラファイトあるいはPt基板上に堆積して用いた。図1に示すように、この薄膜に6～10Vのパルス電圧を加えることによって直径30～100nmの微小分極領域を形成することが可能となる。形成された分極は同じ探針によりその圧電応答を検出することで高分解能で観察することができる。測定された分極領域のサイズは電圧パルスの大きさと時間に大きく依存することが分かり、分極核の発生・成長プロセスと密接に関連することが示された。また走査型マックスウェル顕微鏡（SMM）により、表面電位分布を調べたところ、分極領域には過剰な電荷が注入され、長時間保持されることが判明した。一方、より精密な分子配向制御を目指して、低分子量体の強誘電性分子を真空中で各種基板上に薄膜堆積し、その結晶性および配向特性を評価している。現在までの記録最小サイズは、まだ20nm程度であるが、装置の高分解能化、膜配向の制御、超薄膜化などの研究を今後一層進めにより、単一分子の分極制御をめざしたい。

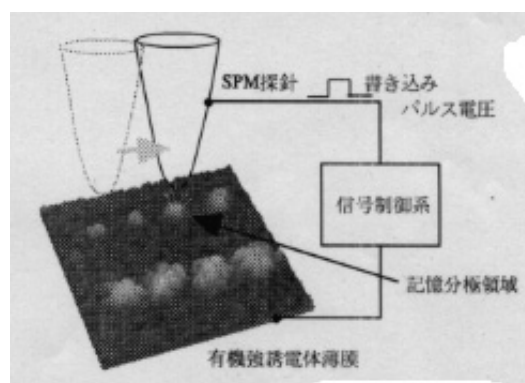


図1 有機強誘電体薄膜上へのナノスケール分極記録

### 3. おわりに

走査プローブ顕微鏡では表面の局所的領域のさまざまな物性を測定することが可能となることから、上記研究の他にも、ユニークな電子物性を示すフラーレン分子（C60）などさまざまな分子の制御・操作技術の研究を行っている<sup>3)</sup>。SPMテクノロジーを進化させることで、かつての思考実験が現実の工学となりつつあり、われわれの研究がこうした未来素子開拓の一助になることを期待している。

### 参考文献

- 1) X.Q. Chen, H. Yamada, T. Horiuchi and K. Matsushige : Jpn. J. Appl. Phys. 37, pp.3834 (1998).
- 2) K. Matsushige, H. Yamada, T. Horiuchi and X.Q. Chen : Nanotechnology, 9, pp.208-211 (1998).
- 3) K. Kobayashi, H. Yamada, T. Horiuchi and K. Matsushige : Appl. Surf. Sci., 317, pp.8435-8438 (1998).



## 電子物性工学専攻 光量子電子工学分野

### 新しい光物質：3次元フォトニクス結晶の開発

本研究室では“次世代フォトニクス／デバイスの実現”という観点から様々な研究を進めている。ここでは、その1つとして、“3次元フォトニクス結晶の開発とそのデバイスへの応用”という目的から進めた研究を取り上げて紹介する。

フォトニクス結晶とは、その内部に設けた周期的な屈折率分布により、光の状態密度が零となる波長域（フォトニックバンドギャップ）をもつ新しい光物質であり、単一モード高効率発光ダイオード、零しきい値レーザ、光パルス圧縮材料、超小型2次元、3次元回路等の量子エレクトロニクス分野における様々な興味深い応用が期待されており、ここ数年大きな注目を集めている。我々はデバイス応用に重要な半導体を用いてこのフォトニクス結晶を実現するため、半導体と空気からなる回折格子を独自のマイクロマシーニング法を用いて3次的に積層し、バンドギャップ形成に不可欠な面心立方構造（ただし格子点是非対称構造をもつ）を形成することを提案し、その実現を目指して研究を進めてきた。図1には、本方法により得られた4～8層のストライプ（周期 $4\mu\text{m}$ ）の積層構造をもつ赤外域3次元フォトニクス結晶の表面写真を示している。同図より、ストライプの位相シフトが正確になされ、狙った結晶構造が正確に実現出来ていることが分かる。図2には、4層および8層からなる結晶の透過スペクトル特性が示されている。同図より、赤外波長域において、4層の結晶で16dBの減衰が、8層の結晶になると30dBもの減衰が得られ、3次元結晶として十分なバンドギャップ効果が得られることが分かる。この30dBという値は反射率にして99.9%に相当し、光子の閉じ込めには十分な値と言うことが出来る。また8層結晶になるとバンドギャップがより明確に現れていることも興味深い。

バンドギャップ域を光通信波長域へと短波長化するため、さらに上述の結晶の格子定数を $1/5 \sim 1/6$ に縮小することも行った。基本ストライプ周期が $0.7\mu\text{m}$ のInPストライプからなる4層積層結晶を作製し、その透過スペクトルを測定した結果が図3に示されている。同図から $1 \sim 1.5\mu\text{m}$ の光通信波長域で明確なバンドギャップが形成されていることが分かる。これは光通信域での完全なバンドギャップをもつフォトニクス結晶の初めての実現と言える。

上記の結果は、様々な極微小光3次元回路（例えば図4に示すようなもの）への展開が可能となることを示唆している。図4は、ナノアンペアしきい値の半導体レーザアレイ、急峻な曲がり導波路、超小型波長分波器、等々が $100\mu\text{m}^2$ という超微小面積に集積されたデバイスを示している。

以上の詳細は、(a) 野田進、電子情報通信学会誌、vol.82, No.3, pp.232-241, 1999年3月号、解説記事、および (b) 野田進、応用物理、vol.68, No.4, 1999年4月号、技術ノート、に記載されている。

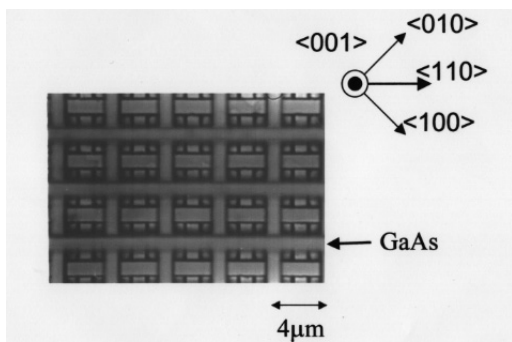


図1：4～8層のストライプ積層構造をもつ赤外域3次元フォトニクス結晶の表面写真

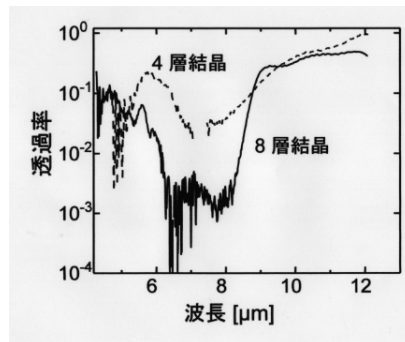


図2：赤外域フォトニクス結晶の透過スペクトル特性

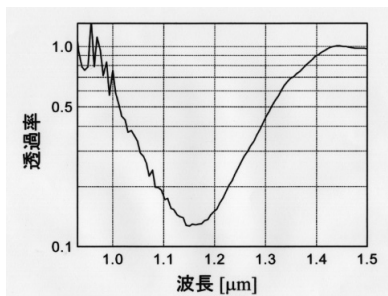


図3：近赤外域4層フォトニクス結晶の透過スペクトル特性

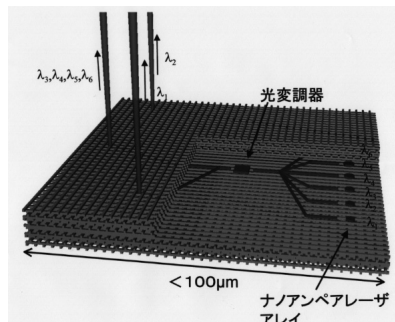


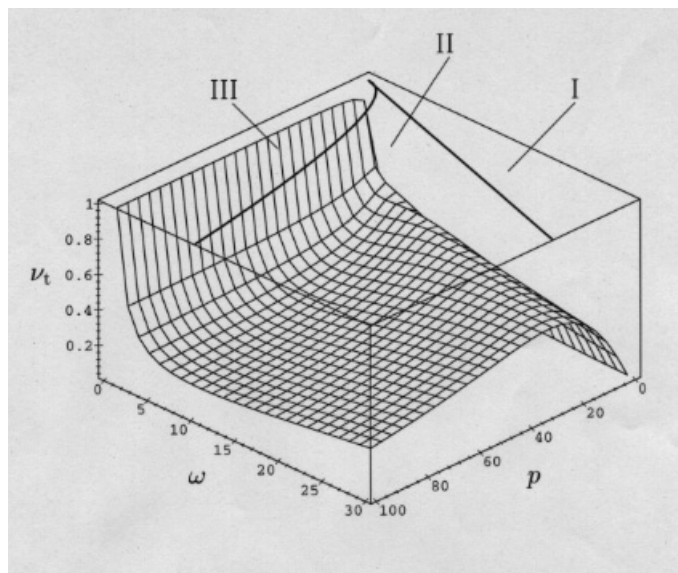
図4：将来展望。極微小3次元光回路。

## 量子工学講座 量子電磁工学分野 量子Zeno効果とその量子制御への応用

量子Zeno効果は、系のユニタリ的な時間発展が、頻繁な観測によって抑制あるいは禁止される現象である。この一見逆説的な現象は、量子力学の本質にかかわる問題として、基礎的な見地から研究が進められてきた。本研究室では、量子Zeno効果を観測そのものではなく、むしろそれに伴うデコヒーレンス (decoherence、量子コヒーレンスの消失) に起因する力学的な現象と捉えなおすとともに、その普遍性、一般性に注目して研究を行っている。特に、観測以外でも、コヒーレンスを消去する機構があれば量子Zeno効果が可能なことや、古典系においても対応する現象が数多く存在することを明らかにしてきた [1]。また、この効果を量子系の制御手段として利用できることも分かってきた。従来から、量子系の制御に用いられている断熱変化やコヒーレントポピュレーショントラッピングとの対比を行っている。最近急速に関心が高まっている量子計算を始めとする量子情報処理の分野ではデコヒーレンスの機構の理解とその低減が非常に重要な課題である。量子Zeno効果は高度な量子制御に対する最大の障害物となっているデコヒーレンスを逆手にとって系の操作に利用できる可能性を示唆している。

ここでは、例として、光ポンピングによるZeno的スピン制御 [2] について紹介しよう。円偏光をスピンをもった原子に吸収させると、角運動量が光から原子に移り、スピンは光軸方向に整列する。この光ポンピングは原子のレーザー冷却などの原子操作で重要な役割を演じている。われわれは、光から原子への角運動量移行よりもむしろ、光によって引き起こされるデコヒーレンスがスピンの運動を支配している場合が存在していることを見出した。この量子Zeno効果によるスピン制御には、光が用いられるにも関わらず、光吸収が伴わないという特徴がある。一つのスピンを反転させるには、その角運動量変化に見合うだけの、光子の吸収が必要だと思われる。しかし、光を強くし、コヒーレンスを効率よく破壊すれば、光吸収をいくらかでも小さくできることが分かった。その様子を図に示す。磁場 ( $\omega$ ) によるスピンの歳差運動を、光 (強度  $p$ ) によって止めるのに必要な光子数 ( $\nu_t$ ) を3次元にプロットしたものである。パラメータが領域 II にあれば、光強度を増して行くと、吸収される光子数が0に漸近するのが見てとれる。吸収がないにも拘らず、スピンの運動を抑制できるのは、不在の測定 (negative measurement) においてもコヒーレンスが消去されていることの証拠にもなっている。

今後は、量子計算に用いられるようなエンタングルした (entangled) 複合系の操作への可能性を探る予定である。



[1] (解説) 北野正雄: 「光と量子Zeno効果」、数理科学 1999年1月号。

[2] M. Kitano, K. Yamane, and T. Ikushima, "Spin Manipulation by Absorption-free Optical Pumping", Phys. Rev. A **59**, 3710 (1999).

## 情報学研究科 知能情報学専攻 知能メディア講座 言語メディア分野 国語辞典を用いた名詞句「AのB」の意味解析

### 1. 研究の背景

これまでの自然言語処理は「文」ごとの解析が中心であり、その中では文中の主要要素である用言（動詞、形容詞など）に重きをおいた解析がなされてきた。しかし、今後は「文章」の解析の研究を進展させる必要があり、そのためには文章中の主題、関連性などを表現している名詞の振舞いを正確に解析することが必要となる。名詞の振舞いを解析するためには、各名詞に関する知識が必要となり、これは知識ベースの問題となる。しかし、名詞の振舞いの多様性、ひいては世界知識の多様性を考えると、人工的な知識表現言語などを導入し、それによって知識を計算機用に記述するということはほとんど不可能である。そこで、自然言語自身によって知識を記述したもの、たとえば国語辞典などをそのままの形で知識ベースとして利用するという方法を考える必要がある。

### 2. 研究の成果

本研究では、上記のような考え方にに基づき、国語辞典の中の必須格とよばれる情報の重要性を指摘し、これを用いて「AのB」という形の名詞句を意味解析する方法を提案した。

名詞の必須格とは、名詞の意味を成り立たせるための必然的な関連要素のことで、たとえば「コーチ」というのは「何かのスポーツ」を教える人であるので、「コーチ」には「スポーツ」という必須格があると考えられる。このような必須格の情報は名詞に関する最も基本的で重要な知識であるが、ここで重要なことはそのような情報の多くが国語辞典に記述されているということである。例えば「コーチ」の定義文は『例解小学国語辞典』（三省堂）で次のように与えられている。

コーチ：スポーツで、そのやり方などを教えること。また、その人。

このように、国語辞典は名詞の必須格に関する知識源とみなすことができる。

必須格情報の一つの利用例として、名詞句「AのB」の意味解析を考えることができる。名詞句「AのB」の意味解析はこれまで非常に困難な問題とされてきた。それは、従来の研究ではまずAとBの間の意味関係を、たとえば、所有、修飾、対象、範疇、目的、結果、……などのように分類するというところを行っていたが、このような分類自体が非常に困難だったからである。

ところが、多くの場合「AのB」は、AがBの必須格要素に対応するという関係を持ち、その場合、AとBの間に意味関係を設定するということはほとんど意味をもたない。たとえば「ラグビーのコーチ」という句では「ラグビー」が「コーチ」の必須格「スポーツ」に対応する。このことは「ラグビー」と「コーチ」の定義文中の「スポーツ」とを対応付けることによって『計算機が解釈した』とみなすことができる。ここで、「対応付ける」とはシソーラス（語を木構造に配列したもので、意味の近い語が近くに配列される）によって計算される語の類似度を基準にして行うことができる。上記のような解釈ができれば、対応するものを置き換えることによって「ラグビーのコーチ」とは「ラグビーでそのやり方などを教えること。また、その人。」であると言い換えることも可能となる。

名詞句300個に対する小規模な実験では、70%～80%の精度でこのような解釈が可能であることがわかったが、今後さらに大規模な評価実験を行う予定である。名詞の必須格情報は、名詞句解析だけでなく、文脈処理における照応の解析など、知識を必要とする多くの場面で有効に利用できると考えられ、今後そのような方向へ研究を進展させていく予定である。

### 参考文献

- [1] Kurohashi, S., Sakai, Y.: Semantic Analysis of Japanese Noun Phrases: A New Approach to Dictionary-Based Understanding, *Proc. of the 37th Annual Meeting of ACL*, 1999.



## 通信システム工学講座 伝送メディア分野（森広研究室） マルチメディアネットワークにおける衛星通信の研究

将来の基幹技術としてATMが世界の各国キャリアから注目されている。ATM網は電話の様なストリーム型情報とインターネットの様なメッセージ型情報の両方を統合した一つのネットワークで転送する事が出来るものである。ここに“垂直統合”と“水平統合”の問題が表面化する。ネットワークとアプリケーションの関係で言えば、垂直統合というのは、あるアプリケーションのために必要なものはネットワークを含めてすべて構築するといった考え方であり、水平統合はアプリケーションとネットワークを分離して構築する考え方である。マルチメディアにおいては後者が正しいと言える（図1）。

ユーザーからみて“あるサービス（産業）の萌芽期においては垂直統合、円熟期には水平統合が優れている”と考えるべきであるが、現在のマルチメディアを取り巻く状況はこれらが混在し、正しいと思える方向が必ずしも明らかではない。“ネットワーク”の定義そのものも、どの機能までをネットワークと呼ぶか、といった解釈が立場に応じて多様であって問題を複雑にしている。

従って、マルチメディアネットワークにおける衛星通信の役割を論じるにあたって最も重要なことは、（1）サービスとネットワークの関係、すなわち水平統合の是非、（2）移動体通信はサービスかネットワークの機能か、の2点に集約される。

地上系ワイヤレスシステムは、アクセス系、中継系といった分離が可能であり、上記の2点は次のように整理できる。移動体通信を含むワイヤレスアクセス系は水平統合されたネットワークプラットフォームであって、有線系と共通のコンテンツにアクセスし利用することが可能である。無線系特有の問題、例えば周波数の有効利用あるいは電波伝播特性など、を考慮して有線系と同一の伝送方式（ビットレート、符号誤り率）が実現できなくても、アクセス系、中継系のインタフェース点において方式変換・再変換を行うことで同等のサービスが提供される。従って、ネットワークプラットフォームの一部としてワイヤレスアクセス系を位置づければアーキテクチャとしても矛盾なく、水平統合の方向と合致する。この場合、移動体通信はモビリティというアクセスネットワークの機能を提供するシステムであって、サービスは電話あるいはインターネットということになる。

衛星通信は、そのサービスエリアの広域性からアクセス系、中継系といった分離が困難である。この事が衛星通信システムを独立のネットワークとサービス（垂直統合）に走らせる理由になっている。しかし、情報流通社会において発展するであろう膨大なコンテンツにアクセスできるネットワークでない限りその発展は望めない。衛星通信をアクセス系に限定して相互接続を考えれば地上系と同様な位置づけが可能であるが、経済性において無理があることは明らかである。アクセス系に限定せず特定のサービスを目的とする独立網を形成し、関門局の形式で既存網と相互接続する方法もあるが、これは水平統合の方向に合致しない。このアプローチは一見現実的と思えるが将来まで考慮すれば経済性や信頼性などで地上方式との競争においてその役割は縮小してゆくものと考えるのが妥当である。地上系・衛星系、有線・無線を問わず、独立網の問題点はそのコストと信頼性である。衛星通信システムは、その広域性とともなワイヤレス系の本質的な特徴（同報性、マルチアクセス性、端末の移動性）を生かして水平統合されたネットワークプラットフォームを実現する一つの手段として利用されるべきである。回線交換の固定通信を対象として実用化されたNTTのDYANETは埋め込み型の理想的な形を示している<sup>1)</sup>。

当研究室では、上記のような観点で、ネットワークのあるべき姿の探求、およびこれを実現するための有線系・地上系を含めた統合化のための諸技術の研究を行っています。

### 参考文献

1) 森広芳照、加藤修三、大貫雅史：衛星中継網方式－DYANET－、電子情報通信学会誌、vol.74, pp.439-456, 1991.

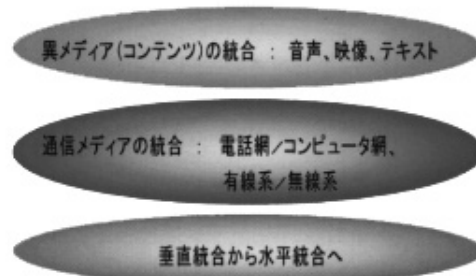


図1 マルチメディアのキーワード＝統合

## 集積システム工学講座 情報回路方式分野（中村研究室）

### Plastic Cell Architecture ～布線論理による汎用計算機構の実現を目指して～

電子計算機は現在の高度情報化社会を支える重要な基盤要素のひとつである。そこでは、CPU（Central Processing Unit）は論理演算素子を配線により結合した布線論理中心で構成されるが、用途に応じた柔軟性、汎用性を持たせるため、メモリ上に置かれたソフトウェアプログラムとデータをCPUにより解釈・実行し、処理するフォン・ノイマン型と呼ばれる計算機構が発明され、これが計算機アーキテクチャの主流となって現在に至っていることは皆様よくご存知の通りである。このアーキテクチャでは、メモリとプログラムによる柔軟性という利点と裏腹に、性能面において、CPU-メモリ間の性能ギャップ、いわゆるフォン・ノイマン・ボトルネックを如何に解消するかに様々な工夫を要しており、永遠の課題となっている。

一方、上記の（CPU-メモリ-プログラム）方式より、布線論理のみによる構成の性能上の有利さは論を待たないが、設計・製造に多大な工数を要し、かつ柔軟性・汎用性に欠ける点が問題とされてきた。しかし、ここに来て、用途に応じて柔軟に回路を再構成できる布線論理として開発されたFPGA（Field Programmable Gate Array）の発展は目覚しく、また、設計面では、例えば、中村教授がNTT在職中に研究・開発した高位ハードウェア記述言語SFLと論理合成系PARTHENONにより、論理回路もソフトウェアと同様、アルゴリズムを記述することにより設計開発が可能となってきた。

このような技術的背景のもと、中村研究室では、メモリに匹敵する一様構造を有する布線論理FPGAと論理合成技術を駆使することにより、フォン・ノイマン型を凌駕する汎用構成方式として*Plastic Cell Architecture*（PCA）を提案し、研究を進めている。この方式が意味を持つための最重点は、ソフトウェアの有する、データや関数等を動的に生成・消去する機能を、布線論理のみで実現させることである。これは、布線論理において、回路が別の回路を動的に生成・消滅させる（自律的再構成）機能の実現を意味する。これをPCAでは、書き込まれ処理機能を実行する可変部と、可変部を制御し、また可変部上に構成された機能部間の通信を担う本能部とをペアとする基本セルを敷き詰めることにより実現する（図1）。可変部上のある機能回路は本能部を介して、別の機能回路を生成することができる。我々は、デバイスの設計・試作から、設計言語の策定、処理系や設計環境の構築、その応用に至るまでの研究・開発を鋭意進めている。

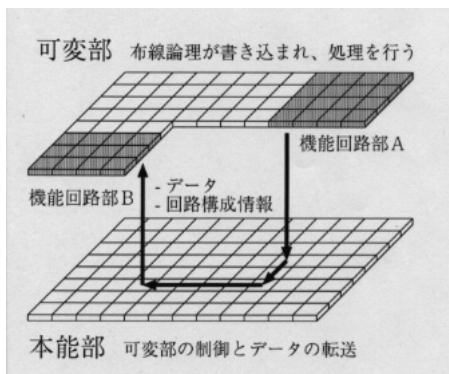


図1：Plastic Cell Architectureの概念図

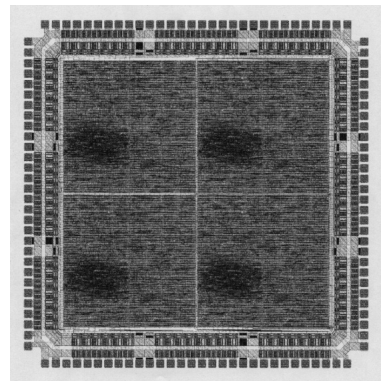


図2：中村研で設計・試作したPlastic Cell Architectureチップ（VDECを通じ、ローム社0.6μmプロセス使用）

#### 参考文献

- ・永見、塩澤、伊藤、小栗、中村：「オブジェクト指向HDLのためのFPGAアーキテクチャ」、DAシンポジウム'97資料集、PP.209-214、(July 1997)
- ・中根、永見、小栗、中村：「自律再構成可能FPGAにおけるメッセージ自己ルーティングのためのセルラー・アルゴリズム」、第11回回路とシステム（軽井沢）ワークショップ、pp.199-204、April 1998.
- ・菅、泉、中村：「プラスチックセルアーキテクチャへのアレイ型論理マッピング手法」、信学技法VLD98-114、CPSY98-134、pp.115-122、1998.
- ・境、深津、中村：「PCAデバイスの設計と試作」、第14回パルテノン研究会資料集、(May 1999)

## 集積システム工学講座 超高速信号処理分野（佐藤研究室）

### 地下探査レーダーにおける安定で高分解能な物体像推定

本分野では、レーダーに代表される各種電磁波計測や光通信など、特に高速な信号処理を必要とする諸分野における信号の性質を研究し、多種・大量のデータを用いた推定の高速化と高精度化の手法を開発することを目標としています。ここではその一例として、レーダー物体像を従来の限界を越える分解能で再現する試みについてご紹介します。

#### 1. 研究の背景

地下構造物や遺跡などの調査に際して、レーダーは非破壊探査の有力な手段として注目されています。しかし、電波は地中では強い減衰を受け、特に高い周波数では減衰が著しく大きくなります。そのため、探査深度を大きくするためにはなるべく低い周波数を用いることが有利ですが、波長が長くなると分解能が低下するという問題があります。一般的な手法である開口合成法では、分解能は約  $1/2$  波長に制限されます。これを越える超高解像度の像再生法も知られていますが、地下のように多くの不要信号の存在する劣悪な電波環境では再現が不安定となります。

#### 2. 研究成果

この問題を回避するために当研究室では、対象に関する先験的知識を用いて、できる限り少数のパラメータで媒質と観測対象をモデル化し、そのモデルからの推定受信信号を観測される信号と比較してモデルを反復改良する方法を開発しています。この手法が実際に利用された例として、トンネル掘削機の前方向監視レーダーにおける障害物自動検出があります [1]。これは、回転するドリル前面に設置されたレーダを用いて、障害となる金属パイプの位置を正確に探知するためのもので、ドリルの回転や前進の情報を利用して、不均質な地下媒質中の影響を除去することができました。

また遺跡探査などにおいて重要な埋設物の形状推定にも、この手法を応用しています。反復改良の過程ではモデルからの電波の散乱を高速かつ正確に計算する必要があるので、電波の散乱に特有の回折波の発生を考慮した拡張レイトレーシング法（図1）を開発し、差分法による計算により2桁高速な推定を可能にしました。これを用いて、減衰と分散を有する媒質中において、従来の手法では点状の物体としか認識できない波長程度の大きさの物体の形状推定が可能となりました [2]。図2は、円柱状の断面を持つ金属物体の形状を反復改良により推定する過程を示します。

#### 参考文献

- [1] T. Sato, K. Takeda, T. Nagamatsu, T. Wakayama, I. Kimura, and T. Shinbo, Automatic signal processing of front monitor radar for tunneling machines, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol.35, No.2, pp.354-359, 1997.
- [2] T. Sato, T. Wakayama, and K. Takemura, An imaging algorithm of objects embedded in a lossy dispersive medium for subsurface radar data processing, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Vol.37, 印刷中.

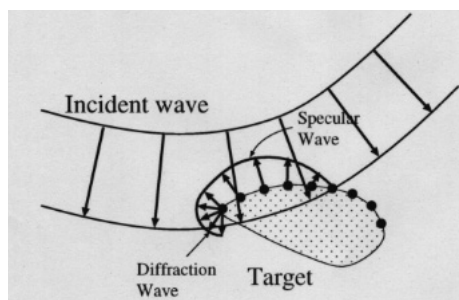


図1：拡張レイトレーシングにおける反射波と回折波の生成

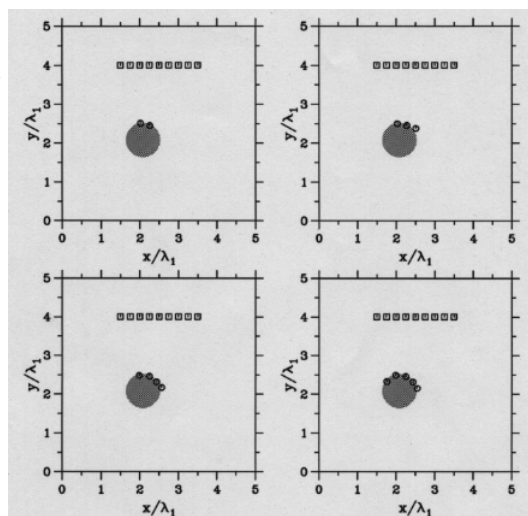


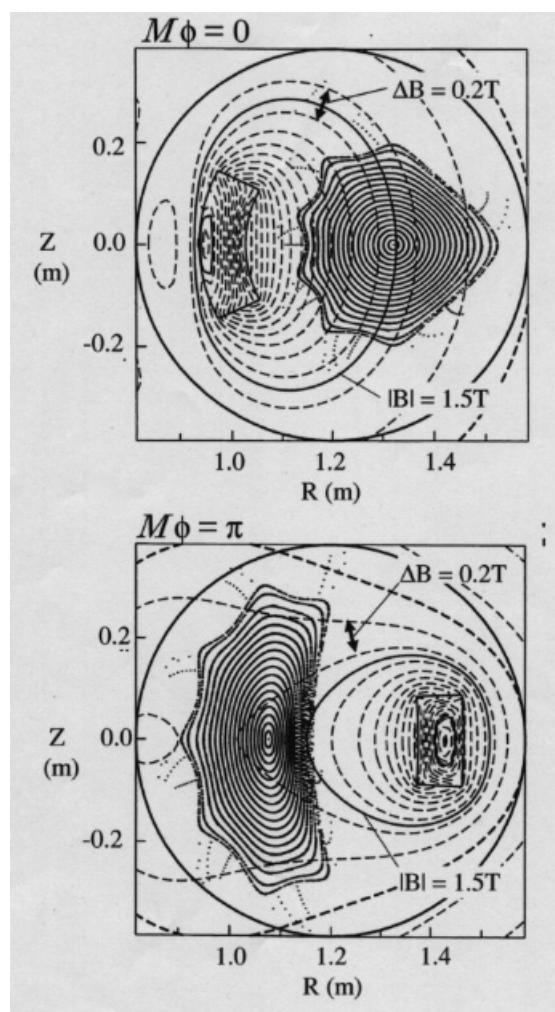
図2：円柱状導体像の推定過程



## エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野（近藤研究室） 「L=1 ヘリカル軸ヘリオトロンプラズマの物理的性質」

現在、エネルギー理工学研究所においてL=1 ヘリカル軸ヘリオトロンプラズマ型の高圧プラズマ閉じ込め装置「ヘリオトロンプラズマ」が建設中である（「cue」No.2 12ページ～14ページ参照）。本研究では、この装置で閉じ込められる高温プラズマの物理的性質を理論・数値解析の観点から調べている。トーラス型（ドーナツ型）の磁場閉じ込め装置では、磁力線はエルゴディックにトーラス状の閉曲面を覆い、いわゆる磁気面を形成している。プラズマ粒子は基本的にはこの磁気面上に閉じ込められ、電磁流体力学（MHD）的に見るとこの面がプラズマの等圧面と一致する。図にヘリオトロンプラズマの典型的な磁気面と真空磁場強度の等高線、ヘリカルコイル断面を示す。2つの図はそれぞれ異なる位置でトーラスを輪切りにした断面である。磁気面を求めるために磁力線追跡を行い、磁力線がこの断面を横切るたびにその位置に点をプロット（ポアンカレ図）すると点列が閉曲線を描き、これが磁気面の断面図を表す。図では数本の磁力線追跡を行っており、トーラス状の磁気面の中にまた別の磁気面が順次存在しており、磁気面が入れ子状の構造をしていることがわかる。図で矩形の実線はプラズマにヘリカル状に巻付いて配置されている有限サイズのヘリカルコイル断面を示し、破線は磁場強度の等高線を示している。この例ではプラズマの中心（入れ子状の磁気面の中心軸、すなわち縮退した磁気面で磁気軸と呼ばれる。図では閉曲線列の中心点）で約1.5Tの磁束密度を持っている。

コイル系が作る真空磁場中でのこのような磁力線追跡により、プラズマ閉じ込めに関する多くの有用な情報が得られるが、実際にプラズマが閉じ込められているときには、その集団的振る舞いにより磁場構造も変化するため、MHD的に平衡な磁場構造、磁気面構造を解析する必要がある。また多くの要因でプラズマ粒子は完全に磁気面上に留まることができず、拡散などの輸送現象が存在する。さらに、MHD的な不安定性によって磁場や圧力の摂動が成長し閉じ込めが悪化する場合もある。そこで高い圧力の高温プラズマをいかに効率的・経済的に閉じ込めるかが重要な問題となる。ここでは先進的なヘリオトロンプラズマ装置においてどのようなプラズマ閉じ込めの最適化実験ができるかを理論的・数値解析的に調べている。図の例のように複雑な磁気面構造を考慮してプラズマ閉じ込めの最適化を図る上で、空間的に三次元の解析が不可欠であり、計算機を用いた大規模数値解析法が用いられる。本研究で得られた成果は本年度からスタートするヘリオトロンプラズマでの実験にフィードバックされることになっており、閉じ込めの最適化研究に大きな寄与を果たすと考えられる。



## 応用熱科学講座 エネルギー応用科学専攻 エネルギー応用基礎学分野（野澤研究室） 強誘電体デバイスの研究

### はじめに

強誘電体メモリ（FeRAM）は、低電圧動作、高速書き換え、不揮発性という優れた機能を有する。しかし、その実用化にはその信頼性等、いくつかの課題の解決が重要である。本研究では、特にインプリント現象の発現メカニズム解明を目的として実験データを基に理論解析を行なうと共に、近年画像処理用並列プロセッサとして注目されている機能メモリ [1] への応用についても研究した。

### インプリントモデル

PZTおよびSBTを用いたサンプルを $-5\text{ V}$ で分極させた後、高温で保持し、ヒステリシス測定をおこなう。測定で得られた、電圧のシフトと分極のシフトに一定の相関性がうかがえる。これは、この2つの現象の発現機構の起源が同一であることを示唆していると思われる。正負の最大電圧を与えた点での分極および残留分極との相対差を測定したもののについて、高温で保持したサンプルの変化を見ると、分極をした方向と逆側の残留分極のみが低下していることがわかる。この現象は、トラップから放出されるチャージがドメインを一定方向に固定するとしてドメインピンニングの理論によって説明が可能である。そこでドメインピンニングに使われるチャージが電子放出に起因すると考え、解析する。分極した強誘電体内部には内部電界が存在すると考えられる。電界中の電子放出は、通常の電子放出に比べ、電界によるトンネル効果の寄与により増大することが知られている [2]。この効果はThermionic Field Emission (TFE) と呼ばれている。強誘電体の内部の電界を、ローレンツの理論にしたがって求め、この効果を考えた電子放出速度を計算した。この計算にしたがって放出された電子がある割合でピンニングを起こすと、電圧のシフトを生じる。図1に各温度における電子放出速度の増加係数を示す。

### 強誘電体機能メモリ

機能メモリはメモリのデータを演算する回路をワードに並列に構成したものである。機能メモリは二つの領域に分けられる。メモリセル領域と論理回路領域である。メモリ部分は、上位ワードと下位ワードに分けられ、これら2ワードを内部演算回路でビット直列、ワード並列で行なわれる。今回の設計では、図2のようなメモリセルを考えた。これは、外部入出力方向（D）と内部演算回路方向（MW）の2方向に読み出し、書き込みできるように、二つのトランジスタを付け加えたものである。図3に今回の試作回路のブロック図を示す。演算部には、排他的論理和をCMOS回路で構成している。演算結果は下位ワードに書き込まれる。

### 結果

本インプリントモデルにより強誘電体の材料系による特性の違いを比誘電率の違いとしてモデル化することに成功すると共に、強誘電体を用いた機能メモリの設計を行ない、はじめてその動作を確認した。

### 文献

- [1] K. Kobayashi et.al, Symp. on VLSI Circuits, pp.61-63 (1995)
- [2] G. Vincent, A. Chantr and D. Bois, J. Appl. Phys. vol.50, pp.5484-5487, 1979.

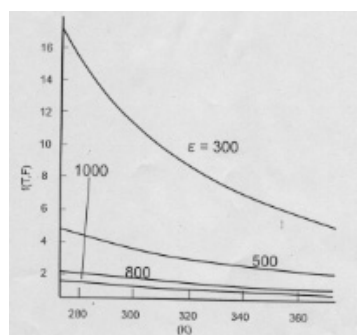


図1 シミュレーション結果

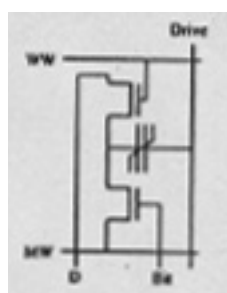


図2 メモリセル

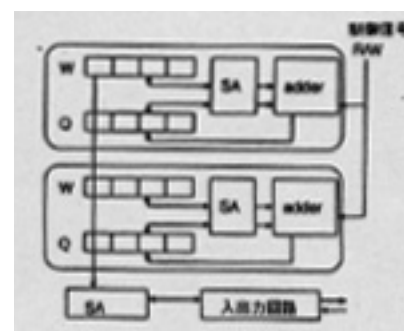


図3 回路ブロック

## エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野（吉川潔研究室） 慣性静電閉じ込め核融合中性子源

慣性静電閉じ込め核融合（Inertial Electrostatic Confinement fusion: IEC）とはイオンを球形状中心に加速収束させ核融合反応を起こさせるもので、ビーム・ビーム衝突核融合の一種です（図1、2）。すなわち、球形状の陽極（真空容器を兼ねる）およびメッシュ状陰極の間でグロー放電を起こさせると生じたイオンは陰極に向かって加速され、メッシュ状陰極を通過し球中心に収束します。イオンビームを球形状中心に収束させると電子はイオンの作るポテンシャルにより同じく球中心に集中してイオンの空間電荷を一部中和し、中心部でのイオン密度を上昇させると考えられています。この概念の基は1950年代に旧ソ連のLavrent'ev、これと独立にP.T. Farnsworth（米国のテレビジョンの父）により電子ビームを球中心に収束させ、電子と中性ガスとの衝突で生じたイオンが電子の空間電荷により加速され球中心で核融合が起こると言う考えから始まります。

IEC装置は将来の核融合炉としての用途以外にも、小型であるという利点から高速中性子・陽子源としてプラスチック爆弾検査、石油探索、医療用照射源など広い応用が考えられます。IEC中性子源は従来の超ウラン元素（例えば $^{252}\text{Cf}$ ）中性子源と比べて、1）エネルギースペクトルが単色、2）崩壊による強度減衰がない、3）取り扱いが極めて容易、4） $\text{D}-^3\text{He}$ ガスを用いれば14.7MeVの陽子源となる、といった点で優れています。1998年9月時点での世界の研究機関で達成された中性子発生量を表1に示します。

本研究室では、IECの動作原理の解明と核融合反応率の向上を目的として、実験と理論の両面から研究を行っています。実験においてはこれまでに直径約35cmの装置で定常的に $5 \times 10^6 \text{ n/sec}$ のD-D中性子発生を実証しました。一方、理論研究においては、原子衝突過程を考慮に入れた粒子シミュレーションコードを作成し、これを用いた解析で得られた主な成果は以下の通りです。

- （1）ガス圧が小さいときエネルギー拡がりの小さい高エネルギーイオンビーム電流がある数居値を越えると正の静電ポテンシャルの山の内側に負の静電ポテンシャルの井戸が生ずる二重井戸構造が生成される。
- （2）二重井戸構造は不安定でカオテックな振動が起こり時間平均の中性子数はイオン電流の2乗以上の依存性を示す。
- （3）イオンのメッシュ陰極透過率は方位角方向の電界の存在により幾何学的透過率より低く、低エネルギーイオンでは特に低い。

今後は、レーザ誘起蛍光法を用いてシュタルク効果による陰極内側の電界分布計測により、二重井戸ポテンシャル構造の時間的・空間的挙動の確認等、IECの基本的動作原理の解明を目指します。また、電子エミッタを設置してペニングトラップにより低ガス圧で動作させる等の改良によって、核融合反応率の大幅な向上を図っていく予定です。

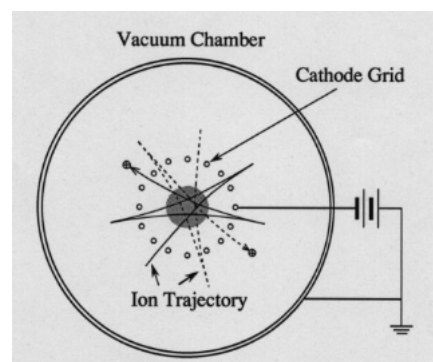


図1 IEC装置の概略図

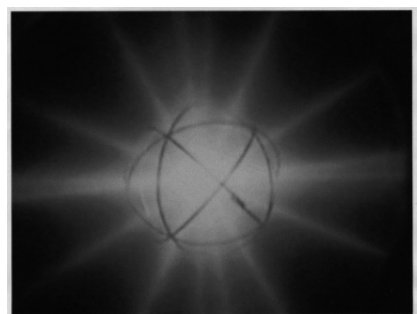


図2 IEC装置での放電

表1 世界の研究機関で達成された中性子発生量

| Intensity (n/s)           | Institution                                 |
|---------------------------|---|
| $5 \times 10^6$ (CW)      | Kyoto University                            |
| $3 \times 10^5$ (CW)      | Idaho Nuclear Engineering Lab.              |
| $5 \times 10^6$ (CW)      | Daimler Benz Aerospace-Space Infrastructure |
| $1.1 \times 10^7$ (pulse) |   |
| $2.0 \times 10^6$ (CW)    | University of Illinois                      |
| $1.0 \times 10^8$ (pulse) | University of Wisconsin                     |
| $5.0 \times 10^6$ (CW)    |   |

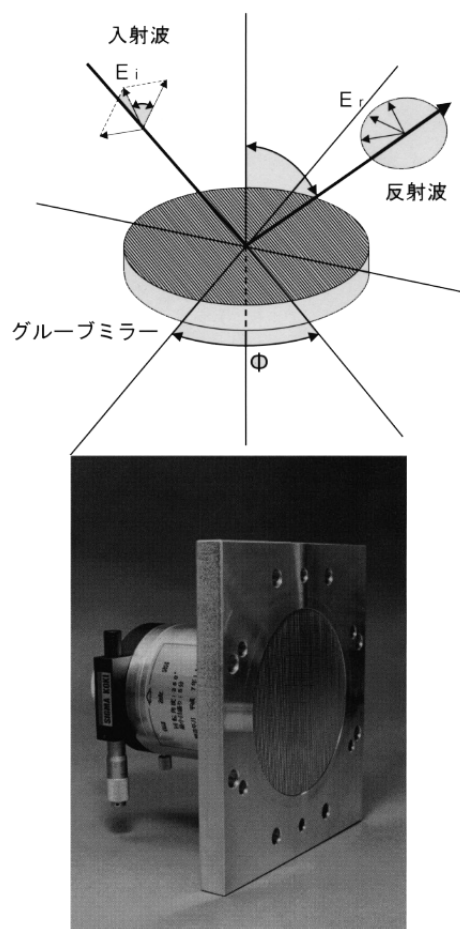


## エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野（大引研究室） 「高電力ミリ波伝送系の開発」

10GHzから数100GHzの周波数帯域で100kWを超える高電力ミリ波は、大気圧プラズマ生成によるオゾン生成、セラミック焼結、長距離レーダ、イオンエネルギー分布測定、高温プラズマの加熱等、幅広い分野において利用されています。特に、磁気閉じ込め核融合装置においては、電子サイクロトロン共鳴を用いた電子の選択的加熱による電子温度分布の制御、非誘導電流駆動、プラズマ生成が行われており、主要な加熱装置として位置付けられています。ミリ波発振源の急速な進展とともに、100GHzを超える1MWレベルの電力を定常動作で長距離伝送できる伝送系が求められています。本研究室では、この高電力ミリ波を高効率で信頼性高く伝送できるシステムの開発を進めています [1]。

偏波器はプラズマに入射するミリ波の吸収を最適化するために必要なデバイスで、通常、伝送システムの一部に組み込まれます。高パワーに耐え得るように偏波器はアルミニウムまたは銅で製作され、場合によっては水冷却されます。偏波面を制御するために波の当たる表面はグループ状になっており、反射波の偏波面はグループの回転方向およびグループ形状に依存しています。グループは局所的に強い電界が立ちやすく、表面でアーキングが発生しやすいので角を落とした形状となりますが、そうした加工は反射波の偏波面に大きな影響を与え、単純な矩形グループとは異なった結果となるため予測が困難でした。そこで、周波数106GHz用にいくつかのグループ形状の偏波器を製作し偏波面の測定を実際に行い、グループ形状を考慮に入れた計算コードとの比較を行いました。その結果、実験で得られた偏波パラメータと計算値がよく一致することがわかり、今後低電力（mWレベル）での動作試験をすることなく、任意グループ形状の偏波器の性能を評価することができることを示しました。また、500kWレベルの高電力伝送系にも設置してプラズマ実験に適用しました。そして、アーキングが発生せず、低挿入損失でモードの攪乱も少ないことを確認しました [2]。

エネルギー理工学研究所では新しいプラズマ実験装置 Heliotron J の建設が進められており、電子サイクロトロン共鳴加熱のための高電力ミリ波伝送は欠かすことができないシステムです。Heliotron J 装置での加熱実験に最適な伝送システムを構築するとともに、ITER、LHD、W7-Xといった大型核融合装置でも利用可能なミリ波コンポーネントの開発を進めていく予定です。



グループミラー偏波器の原理図（上）  
とヘリオトロン装置の106GHz 伝送  
システムに使用した偏波器（下）。

[1] K. Nagasaki, et.al., Fusion Technology 32 (1997) 287-295.

[2] K. Nagasaki, et.al., to be published in Int. J. Infrared and Millimeter Waves.

## レーダー大気物理学部門（深尾研究室）

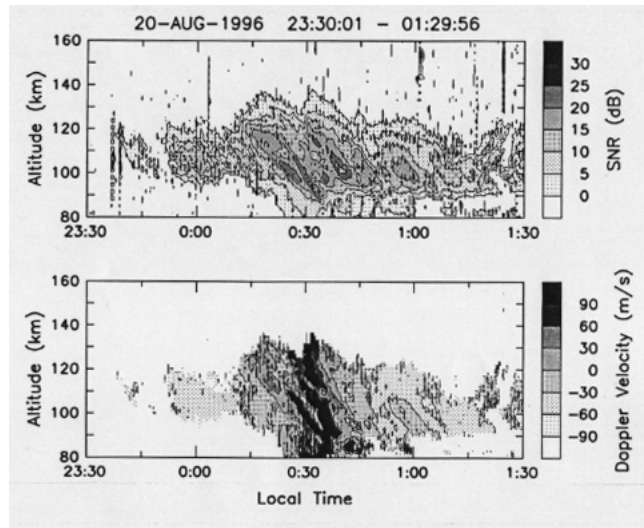
### MUレーダーやロケット観測にもとづく電離圏イレギュラリティの研究

当研究室は超高層電波研究センターに所属し、MUレーダー（滋賀県信楽町）を管理運営する立場にあり、これを用いた大気力学の研究を、レーダーリモートセンシングの工学的研究と共に行っています。ここでは、最近世界的にも多くの注目を集めつつある電離圏の不規則構造（イレギュラリティ）の研究を紹介します。

地球大気は下層では電気的中性を保っていますが、高度100km程度以上では太陽紫外線やX線によって分子の一部が電離され、宇宙空間へと移り変わっていきます。この領域が電離圏（古くは電離層と呼ばれた）であり、プラズマ（電子）密度の分布によって、*E*領域（高度100～150km）、*F*領域（高度200km以上）等の領域に分類されます。

電離圏は、太陽活動度の変化、太陽放射の季節・日周変化などに伴って変動を繰り返すとともに、背景に存在する電気的中性大気の影響も大きく受けています。

従来の研究では、電離圏イレギュラリティは磁気赤道やオーロラ帯においてのみ顕著であるとされてきました。しかしながら当研究室では、MUレーダーの機能を活かした観測によって中緯度域における活発なイレギュラリティの存在を世界に先駆けて実証しました。我々の研究によって*F*領域においては「泡（ブリューム）」と呼ばれるエコー領域のダイナミックな振舞いが発見され、また*E*領域においても周期数分から十数分の規則正しい波動構造を示す「準周期エコー」が見出されました。1996年8月には、文部省宇宙科学研究所の2機のロケット観測と地上の可搬型レーダーや光学観測を組合せた総合観測キャンペーンSEEK（Sporadic-E Experiment over Kyushu）を提唱し、日本・米国・台湾の研究者の参加を得て、地上のレーダーで右上図に示す*E*領域イレギュラリティの観測中にロケット観測を成功（左下図）させています。



今までに、中緯度イレギュラリティに特有の構造が電離圏の背景にある中性大気の振舞いに大きく依存することが分かっています。特に大気重力波と呼ばれる波動がプラズマに働く電界やその中の電流を作り出し、イレギュラリティ発生の原因を作っているようです。これは、地球大気と宇宙空間とのかかわりを研究する上で絶好の教材です。この研究テーマに関しては、本年度に電離圏イレギュラリティ観測専用のレーダーを導入して来年度から長期観測を開始する予定であり、また2001年の夏には次期ロケット観測であるSEEK-2を実施するべく計画を進めています。

## 数理電波科学部門（橋本研究室） 科学衛星搭載用知的波動受信機の開発

本研究室では電磁力学・計算電磁気学・電波工学・通信工学を基礎とし、宇宙空間を舞台とする研究を行っている。テーマの一つに科学衛星による波動観測があるが、そのための衛星搭載用波動受信機の設計開発について述べる。

火星などの惑星探査といった飛翔体からの超遠距離伝送が余儀なくされる場合は言うに及ばず、地球や月周回科学衛星の場合でも、最近では伝送すべきデータ量はテレメータの伝送速度をはるかに越えている。そこで、効率よく伝送するために、観測データをデジタル信号処理し、データ圧縮を行うとともに、機上で信号の内容や緊急時に必要な動作などを自律的に判断して観測モードの自動変更を行い、必要なデータだけを選別して地上に伝送する、高い知的機能を持つ波動受信機の開発を行っている。今まで別の装置で行われていた波形伝送や周波数分析などが同時に可能であるので、柔軟な解析が行えるとともに、小型化にも貢献する。

図1のブロック図に示すインテリジェント受信機のプロトタイプを作成し、図2に示すサブバンド圧縮の原理に基づく圧縮法を開発した。実際に衛星で観測されたデータ波動データに対し、今のところ3～4分の1に圧縮が可能である。さらに、図3に示す原理に基づくDigital Down Converter (DDC) を使用し、高速A/D変換されたデータの特定の帯域をデジタルのまま周波数を下げ、圧縮して波形伝送ができる。またある帯域の信号の周波数を下げ、その信号に対してFFTを施すと掃引受信機ができる。図4は2MHzまでの例である。図1のST114ボードにDDCが搭載されており、実際にソフトウェアを作成した。その結果、アナログ方式の科学衛星GEOTAILの波動観測装置に比して、広範囲、高分解能でかつ数10倍高速な掃引受信機が実現できた。これらの成果は、2003年打ち上げ予定の月周回衛星や2000年予定のロケット実験などにおける波動観測に生かされることになっている。

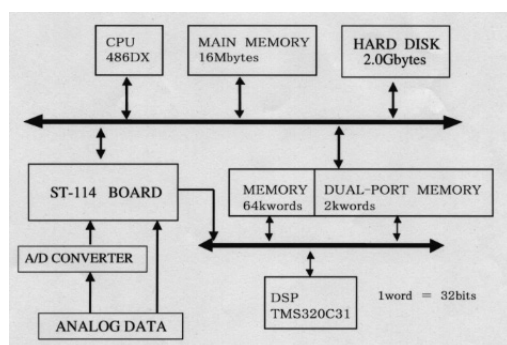


図1. インテリジェント受信機（試作機のブロック図）

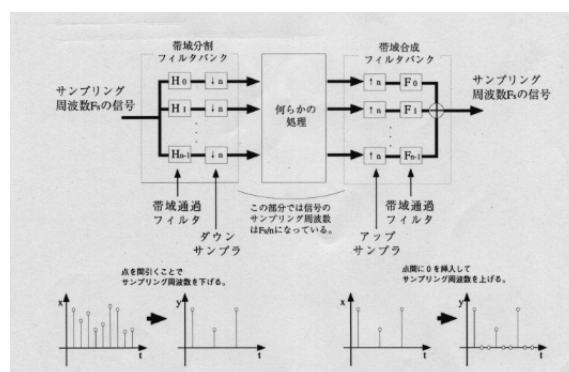


図2. サブバンド分割の原理

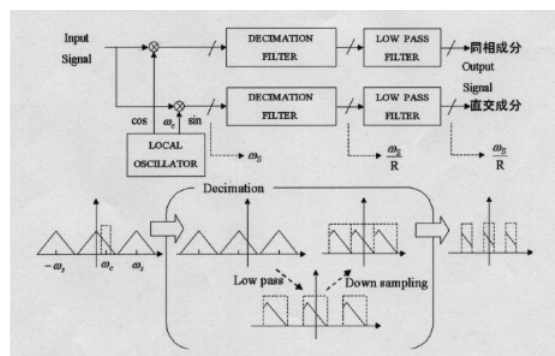


図3. Digital Down Converter (DDC)の原理

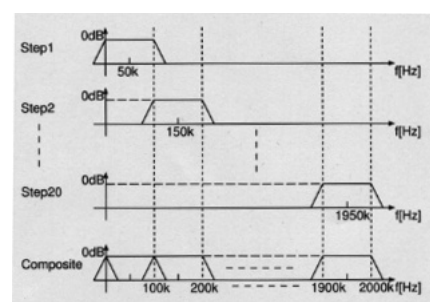


図4. 掃引受信機の例



## 京都大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー (KU-VBL) ベンチャー精神あふれる若手研究者育成のための教育プログラム

京大VBLでは、独創的研究の推進・創造性教育プログラムの実施を通して、将来の産業を支える基盤技術の開発と起業家マインドを持った若手研究者の育成に努力しています。「先端電子材料開発のための原子・分子アプローチ」をターゲットとした研究/開発に加えて、VBL主催の授業として、前期に「新産業創成論」、後期に「先端電子材料学」を開講しています。更に、これらに加え、大学院生を中心とする若手研究者の発想や創造性を養成する教育プログラムとして、**各種VBセミナー、特許講習会・相談室、テクノアイデアコンテスト**などを実施しています。各講演においては、教科書的なものよりはむしろ最先端のトピックスを話していただいています。学生たちは最先端の研究に触れることにより、自分たちが開拓すべき領域の広範性・多様性を知り、また、従来の授業にはなかった双方向的講演・質疑応答を通じて自己表現やコミュニケーションのあり方を学んでおり、高い教育的効果をあげています。また、講演の内容自体も、体系的な内容ばかりでなく、弁理士による知的所有権に関する講義や実際の企業の経営陣・研究者による講義などを開講し、ベンチャー精神に富んだ人材の育成に力を入れています。VBLの活動内容詳細は、<http://www.vbl.kyoto-u.ac.jp/>にて紹介しています。

### '99年「新産業創成論」カリキュラム

| 年月日   | 講義内容                       | 講演者                       |
|-------|----------------------------|---------------------------|
| 4月12日 | 新産業創出への大きな動き・概論            | 工学研究科 教授 松重和美             |
| 4月19日 | 21世紀に向けてのベンチャービジネス         | (株)ローカス 社長 神島博昭           |
| 4月26日 | 知的財産権ー1ー                   | 弁理士 小林良平                  |
| 5月10日 | 知的財産権ー2ー                   | 弁理士 小林良平                  |
| 5月17日 | ベンチャー経営・社会環境分析             | 経済学研究科 教授 赤岡 功            |
| 5月24日 | 21世紀へのテクノロジーナノテクノロジー       | 工学研究科 教授 松重和美             |
| 5月31日 | 21世紀に必要とされるVLSIの方式設計技術     | 情報学研究科 教授 中村行宏            |
| 6月7日  | 新鋭の研究者の能力を最大に引き出すには？       | 工学研究科 教授 村上正紀             |
| 6月14日 | 工学の目的としての幸福論               | エネルギー科学研究科 教授 新宮秀夫        |
| 6月21日 | ベンチャー企業経営と企業家精神            | 慶応大学 教授 千本倅生              |
| 6月28日 | 京都モデルとハイテクベンチャー企業の成功要因 -1- | (株)サムコインターナショナル研究所 社長 辻 理 |
| 7月5日  | 京都モデルとハイテクベンチャー企業の成功要因 -2- | (株)サムコインターナショナル研究所 社長 辻 理 |
| 7月12日 | 講義受講者による発表・討論              | 工学研究科 松重和美、川上養一、多田博一      |



弁理士、VB 起業家など多彩な講師を招聘  
(写真：昨年度講師の慶応大 千本氏)



VBLセミナー室での講義風景